



بسم الله الرحمن الرحيم

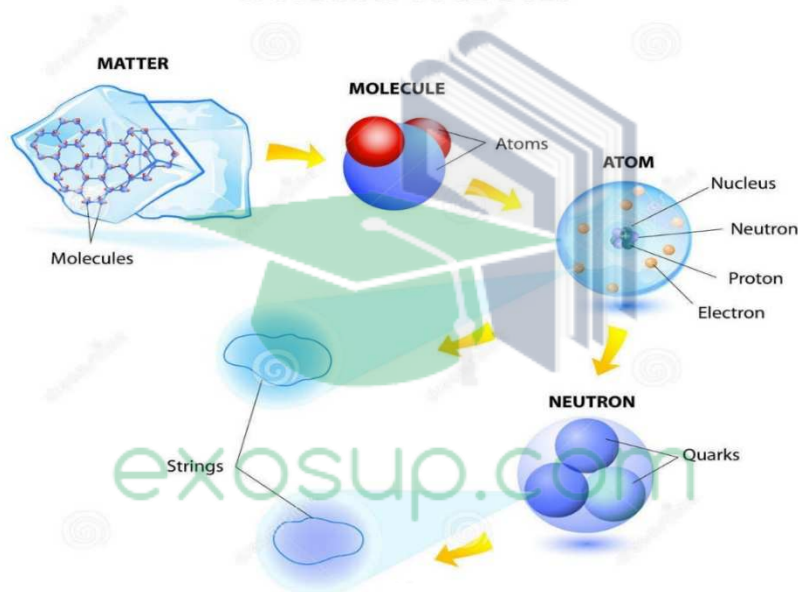
**FACULTE DES SCIENCES DHAR
EL-MAHAZ - FES
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED
BEN ABDELLAH**

Projet de fin d'étude



La Théorie des cordes

STRING THEORY



Licence Fondamentale

Filière : SCIENCES DE LA MATIERE PHYSIQUE

Parcours : Physique Des Matériaux

Réalisé par :

**BENJELLOUN Mohammed
EL-MARIAOUI Houssam**

Encadré par :

Prof. ACHKAR Yamina

Année Universitaire : 2013 - 2014

Remerciements

Certains disent que le plus important dans un projet de fin d'étude est les remerciements. Nous ne sommes pas loin d'être de cet avis, car si vous avez ce projet de fin d'étude entre les mains, c'est en grande partie grâce à tous ceux qui nous ont aidés plus ou moins directement au cours de sa réalisation.

- Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à Madame Yamina ACHKAR d'avoir encadré notre projet de fin d'études et d'avoir toujours été disponible. Elle nous permet de préparer ce projet dans les meilleures conditions possibles. Merci.
- Nos gratitude s'adressent, également, au Professeur Az-Eddine L.MARRAKCHI et au Professeur Abdelhafid CHTWITI d'avoir accepté d'examiner ce travail. Nous leur remercions aussi pour leurs conseils et leurs remarques fructueuses.
- Bien entendu, nous sommes reconnaissants à ma famille, nos parents et nos professeurs, qui ont été présents tout au long de notre scolarité et de notre étude. Ils nous ont toujours soutenus dans les moments où nous en avons besoin et qui nous ont permis de faire nos études dans les meilleures conditions. Jamais nous n'aurions pu faire ce travail sans leur soutien. Merci à vous.
- Nous nous permettons de remercier tous ceux qui, de près ou de loin et d'une manière ou d'une autre, nous ont été d'une utilité non négligeable et d'un quelconque soutien tout au long de la réalisation de ce projet et qui sont bien trop nombreux pour tous les citer.

Table des matières

Remerciements.....	1
Introduction.....	4
Chapitre 1 : Approche historique	5
I. La relativité générale	5
1. Principe de relativité.....	5
2. Principe d'équivalence.....	6
3. Géométrie Pseudo-Riemannienne	6
4. Equations d'Einstein	7
II. La mécanique quantique	8
1. Le principe de superposition	8
2. L'indéterminisme de la mesure	8
3. La dualité onde-corpuscule.....	9
4. L'intégrale de chemin	9
5. La quantification	9
6. Le principe d'incertitude de Heisenberg.....	10
III. Les quatre forces fondamentales	10
1. L'interaction gravitationnelle.....	10
2. L'interaction électromagnétique	10
3. L'interaction forte	11
4. L'interaction faible.....	11
IV. L'unification des forces.....	12
1. Le modèle standard	12
2. Unification Electrofaible	12
3. Comment trouver le boson de Higgs ?	13
4. Unification électronucléaire	13
5. Les particules messagères de chaque force	14
Chapitre 2 : Qu'est-ce que c'est la théorie des cordes.....	15
I. La théorie des cordes classique	15
1. Critique du Modèle Standard	15
2. L'émergence de la théorie des cordes.....	16
3. Définition des cordes.....	17
4. Masses et tension des cordes.....	17
5. Compatibilité de la Relativité et de la Mécanique Quantique.....	18
6. Les symétries et le spin	18
7. Avantages et problèmes	19

II. La première révolution	21
1. La super symétrie.....	21
2. Théorie de Kaluza-Klein	22
3. La théorie des supers cordes	23
4. Théorie de type I	25
5. Théories de type II	25
6. Théories hétérotiques.....	26
III. La seconde révolution.....	27
1. La dualité T.....	27
2. La dualité S.....	28
3. Les résultats de la seconde révolution	30
IV. La théorie M.....	31
4. La dualité U	31
5. La théorie M.....	31
Conclusion.....	33
Bibliographie	34

Introduction

Actuellement, deux modèles effectifs décrivent toute la physique connue : la relativité générale d'Albert Einstein, et le modèle standard basé sur la théorie quantique des champs. Néanmoins, ils ne sont pas exempts de tout reproche :

- L'unicité : deux théories sont nécessaires et non pas une seule, ce qui n'est pas tout à fait satisfaisant. En effet, il a été démontré qu'une théorie quantique de la gravitation serait non renormalisable, c'est-à-dire que seule la relativité générale permet de décrire la force gravitationnelle ce qu'il est impossible avec les outils du modèle standard qui nous donne une explication exacte pour les trois autres forces fondamentales.
- L'esthétique du modèle standard : celui-ci englobe toutes les particules connues et nous permet de les différencier les uns des autres, ce qui nous pousse à penser qu'il existe à l'intérieur de ces particules quelque chose qui fait cette différence et donne à chacune ces propriétés.

La théorie des cordes réunit la mécanique quantique et la relativité générale. Dans cette théorie, les objets fondamentaux sont les cordes, et les particules observées correspondent aux vibrations de ces cordes. La théorie originale et appelée la théorie de corde bosonique, qui a plusieurs lacunes fatales, donc il a été remplacé par une théorie surnommée supercorde que l'on pourra subdiviser en cinq théories. Il y avait une croyance que tous ces derniers sont indépendants les uns des autres, mais il a été atteint à la découverte d'un type de relation entre eux et nommé cette relation dualité. Donc on pourra convertir ces cinq théories en une seule appelée la théorie M.

A partir de la théorie M, on va entrer dans plusieurs notions très importantes comme les branes et les dimensions supplémentaires, et expliquer la physique des particules, on pourra aussi comprendre le rôle de la supersymétrie et la supergravité pour décrire ce qui se passe dans un trou noir ou donner des explications des premiers instants de la création de l'univers connue sous le nom du big bang.

Chapitre 1 : Approche historique

I. La relativité générale

La relativité générale est le fruit des efforts consentis par Einstein entre 1907 et 1915 qui lui ont permis de donner des explications de l'interaction gravitationnelle dans le cadre relativiste. Avant Einstein, la théorie newtonienne postulait que la force gravitationnelle exercée entre deux masses m_1 et m_2 distants de r est donnée par ;

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}_r \quad (1)$$

Les effets de l'interaction gravitationnelle se faisaient donc sentir instantanément dans tout l'espace, en contradiction flagrante avec les lois de la relativité restreinte, établit par Einstein, selon lesquelles aucun signal ne peut se propager plus rapidement que la vitesse de la lumière.

1. Principe de relativité

En mécanique classique, le principe de relativité restreinte postule que les lois de la physique sont les mêmes pour tous les observateurs inertiels, c'est-à-dire animés d'un mouvement rectiligne et uniforme.

Soit un observateur inertiel O dans le système de coordonnées (x, y, z, t) et un observateur inertiel O' le système de coordonnées (x', y', z', t') qui est en mouvement rectiligne uniforme par rapport à O à la vitesse v suivant (ox) ,

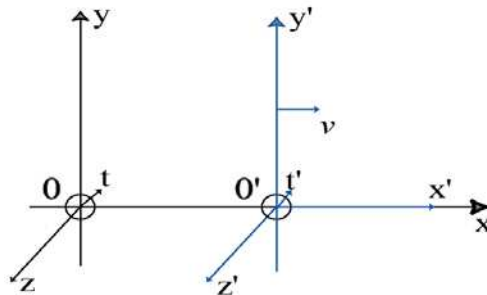


Figure 1

En appliquant les transformations de Galilée suivantes :

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (2)$$

Aux équations de Maxwell de l'électromagnétisme, on aboutit aux transformations de Lorentz :

$$\begin{cases} x' = \frac{(x-vt)}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t-vx/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \end{cases} \quad (3)$$

Où c désigne la vitesse de la lumière, et t et t' est le temps mesuré par une horloge au repos respectivement par rapport à O et O' .

Ainsi, Einstein postula que les lois de la physique sont invariantes lorsque l'on passe d'un référentiel inertiel à un autre en utilisant les règles de transformations de Lorentz. Comme la transformation de Lorentz relative au temps t' fait intervenir les coordonnées spatiales, le concept de simultanéité est profondément modifié dans la nouvelle théorie. La théorie de la relativité restreinte amène aussi de nouveaux phénomènes physiques ; la dilatation du temps, la contraction des longueurs et la célèbre relation $E = mc^2$ entre énergie et masse.

Cependant, la théorie de la gravitation basée sur la loi de Newton (Eq. (1)) ne trouve pas de place dans le cadre de la relativité restreinte. Le premier pas vers la relativité générale et le traitement relativiste de la gravitation fut la géométrisation de la relativité restreinte par H. Minkowski. En géométrie Euclidienne, la distance ds entre deux points (x, y, z) et $(x + dx, y + dy, z + dz)$ s'exprime par $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$, d'après le théorème de Pythagore. Les transformations de l'espace qui laissent invariante cette manière de mesurer les distances sont les translations et les rotations. De la même manière, les transformations de Lorentz qui sont des translations dans l'espace et le temps, forment le groupe des transformations de l'espace-temps qui laissent invariant le carré de l'intervalle minkowskien

$$ds_{\text{Min}}^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (4)$$

2. Principe d'équivalence

La théorie relativiste de la gravitation repose sur le fait expérimental que, dans un champ gravitationnel constant, tous les corps tombent de la même manière. Ceci se traduit par l'égalité numérique entre la masse inertielle m_i (qui figure dans la loi de la dynamique $\vec{F} = m_i \vec{a}$) et la masse gravitationnelle m (qui intervient dans la loi de Newton (Eq. (1))).

Einstein comprit que cette égalité numérique indiquait réellement une équivalence entre gravitation et inertie. Il construisit sa théorie à partir de l'idée que les effets d'un champ gravitationnel peuvent être compensés en utilisant un référentiel accéléré. Plus précisément, Einstein postule que dans un référentiel en chute libre, les lois de la physique sont celles valables en absence de champ de gravitation, c'est-à-dire celles de la relativité restreinte dans un référentiel inertiel. Vice versa, les forces dues à l'accélération d'un référentiel peuvent être vues comme équivalentes aux forces gravitationnelles dans un référentiel inertiel.

3. Géométrie Pseudo-Riemannienne

Si on admet des référentiels accélérés, l'intervalle Minkowskien n'est plus invariant, mais peut se transformer en un intervalle dont les coefficients dépendent des coordonnées de l'espace-temps x^μ , où $x^0 = ct$, $x^1 = x$, $x^2 = y$, $x^3 = z$,

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x^\lambda) dx^\mu dx^\nu \quad (5)$$

La théorie mathématique qui traite des espaces munis d'une telle structure est la géométrie Pseudo-Riemannienne. Dans ce cadre mathématique, le principe d'équivalence s'exprime par le fait que localement, c-à-d au voisinage d'un point, on peut toujours trouver un système de coordonnées dans lequel l'intervalle (Eq.5) se réduit approximativement à l'intervalle Minkowskien (Eq. 4), qui s'écrit dans cette notation

$$ds_{Min}^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad \text{Avec} \quad \eta_{\mu\nu} = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$$

Il n'est généralement pas possible de trouver de référentiel dans lequel ceci est valable partout. L'obstruction à l'existence d'un tel référentiel est à chercher dans le tenseur de courbure de Riemann $R_{\mu\nu\rho}^\lambda$ construit sur la métrique $g_{\mu\nu}$ et ses dérivées.

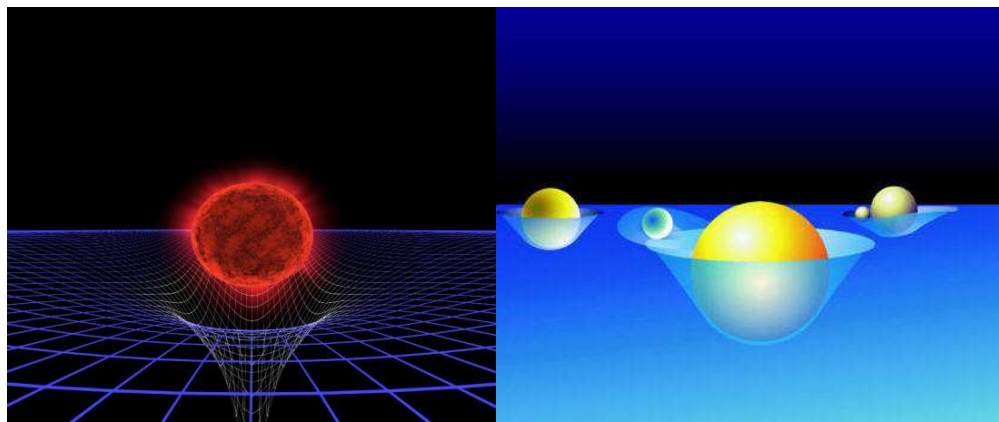


Figure 2: la courbure de l'espace-temps

4. Equations d'Einstein

Pour Einstein, le champ qui décrit la géométrie de l'espace-temps et aussi la gravitation est donc la métrique $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$ qui intervient dans l'expression générique d'un intervalle de longueur. Partant du principe d'équivalence, il réussit finalement, en 1915, à trouver les équations qui relient cette métrique au tenseur d'énergie-impulsion $T^{\mu\nu}$, en particulier à la densité d'énergie de la distribution de matière. Les équations dynamiques pour le champ de gravitation $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$ s'écrivent en termes du tenseur de Ricci $R_{\mu\nu}$ et de la courbure scalaire R , tous deux des combinaisons du tenseur de courbure de Riemann et de la métrique :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (6)$$

En 1917, en vue d'obtenir une solution de ses équations globalement homogène et stationnaire, d'intérêt cosmologique c-à-d applicable à l'univers, Einstein proposa une modification de (Eq. 6) par l'introduction d'une constante cosmologique.

Dans la relativité générale, la structure de l'espace-temps, révélée au travers du tenseur métrique et décrivant tous les effets gravitationnels, devient donc une entité dynamique régie par la distribution de matière. Par ailleurs, la courbure de l'espace-temps dicte les règles du mouvement de cette matière. C'est ce qu'expriment les équations d'Einstein.

II. La mécanique quantique

La mécanique quantique est la branche de la physique qui décrit le comportement des objets microscopiques : les molécules, les atomes et les particules. Développée pendant la première moitié du XXe siècle, la mécanique quantique est un des piliers de la science contemporaine. Et pourtant, il s'agit aussi probablement de la plus étrange théorie jamais imaginée. En effet, cette théorie est d'ailleurs tellement mystérieuse que l'un de ses plus fameux contributeurs, le physicien Richard Feynman, disait à son propos : « Si vous croyez comprendre la mécanique quantique, c'est que vous ne la comprenez pas ».

Nous proposons, donc, de faire un tour d'horizon de ces mystérieux principes de la mécanique quantique.

1. Le principe de superposition



Figure 3: la superposition des états et chat de Schrödinger

Dans la mécanique dite "classique", quand on étudie le mouvement des objets macroscopiques, les grandeurs dynamiques telles que la vitesse, la position, la vitesse, l'énergie..., sont définies avec précision. Mais pour les objets microscopiques, une particule peut être dans un mélange de plusieurs états. Ce qui veut dire qu'un électron peut, par exemple, être à deux ou plusieurs endroits différents à la fois. Cette propriété est le principe de superposition. Cette étrange superposition des états a été connue à travers l'exemple du fameux chat de Schrödinger, ce chat «fictif» qui serait à la fois mort et vivant. En utilisant la notation de Dirac, on pourrait écrire :

$$|\text{Chat}\rangle = |\text{Mort}\rangle + |\text{Vivant}\rangle$$

Bien sûr, l'exemple du chat n'est pas très réaliste, car cette situation ne peut se produire que pour les objets microscopiques. Et cette idée de superposition des états du chat de Schrödinger est une simple manière d'expliquer cette étrangeté de la mécanique quantique.

2. L'indéterminisme de la mesure

Deux postulats de la mécanique quantique stipulent que :

1. Toute l'information sur l'état quantique d'une particule est contenue dans le vecteur d'état ou la fonction d'onde (postulat 1 de la mécanique quantique).
2. Les résultats d'une mesure d'un état quantique sont fondamentalement imprévisibles et ne peuvent être décrits qu'en termes de probabilité (postulat 4 de la mécanique quantique).

3. La dualité onde-corpuscule

Elle a été proposée, en 1924, par Louis De Broglie : toutes les particules quantiques présentent ce double aspect onde-corpusculaire. En effet, à toute particule de matière animée d'une vitesse v et d'impulsion p , on fait associer une onde de matière de longueur d'onde ;

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Cette dualité a bien été confirmée par des expériences, elle est valable aussi bien pour la lumière que pour la matière. Aussi, les particules peuvent suivant les circonstances se comporter soit comme des corpuscules, soit comme des ondes.

4. L'intégrale de chemin

En mécanique quantique, puisque les particules peuvent être à plusieurs endroits à la fois, elles peuvent aussi suivre plusieurs chemins à la fois ! Dans de l'expérience de la double fente, il a été constaté que même quand l'électron semble passer par la fente A, son trajet dépend du fait que la fente B soit ouverte ou fermée.

Le physicien Feynman a donné une interprétation en admettant que pour aller d'un point à un autre, une particule quantique passe par tous les chemins possibles qui relient ces deux points ; cette approche est connue sous le terme de l'intégrale de chemin.

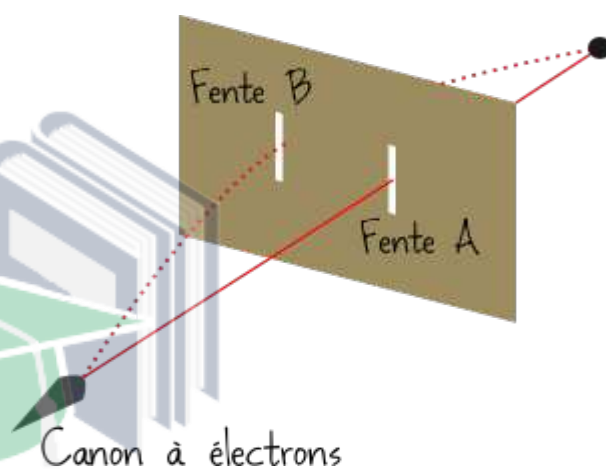


Figure 4 : fente de Young

5. La quantification

En mécanique quantique, certaines quantités ne peuvent prendre que des valeurs bien définies, on dit qu'elles sont quantifiées. Par exemple un atome d'hydrogène dans son état fondamental aura une énergie de -13.6 eV, celle du 1er état excité énergie est -3.4 eV. Il est impossible de trouver une énergie intermédiaire entre ces deux valeurs, ou une énergie inférieure à la valeur de -13.6 eV ! Sinon les atomes seraient instables ; la mécanique quantique a permis de résoudre ce paradoxe que la mécanique classique n'expliquait pas.

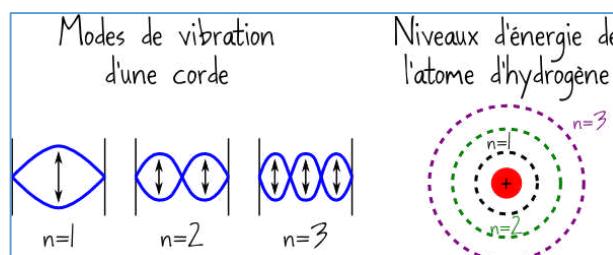


Figure 5

Mais au fait, pourquoi certaines propriétés seraient-elles quantifiées ? Il est possible de la comprendre en considérant simplement la description ondulatoire des particules. Considérons une

onde : celle qui agite une corde de guitare. Puisque la corde est attachée aux deux extrémités, elle ne peut vibrer qu'à certaines fréquences. Les sons émis par une corde le sont donc à des fréquences discontinues, et ne prennent pas des valeurs intermédiaires ! Il se passe le même phénomène pour les ondes qui décrivent les particules, et plusieurs quantités physiques qui décrivent les objets microscopiques sont quantifiées.

6. Le principe d'incertitude de Heisenberg

Le principe d'incertitude de Heisenberg est une des propriétés les plus caractéristiques mais aussi les plus étranges du monde quantique ; On ne peut pas mesurer à la fois exactement la position et l'impulsion (ou vitesse) d'une particule. Plus sa position est déterminée avec précision plus sa vitesse est incertaine, et réciproquement. Ce principe est décrit par la relation d'incertitude de Heisenberg :

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

III. Les quatre forces fondamentales

1. L'interaction gravitationnelle

Newton énonça la loi de la gravitation universelle, en 1686, entre deux masses m_1 et m_2 distants de r :

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}_r$$

Où $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$ est la constante de gravitation universelle, dite de Cavendish.

La gravitation est une force attractive de portée infinie. Sur le plan macroscopique, elle gère les mouvements des corps célestes, des planètes aux galaxies. Sur le plan microscopique, son action est négligeable par rapport aux 3 autres forces.

2. L'interaction électromagnétique

L'interaction électromagnétique est la force qui agit à l'échelle microscopique tels que les atomes, les molécules,... Ses effets se manifestent aussi à l'échelle macroscopique. Elle engendre par exemple les forces de frottement, produit l'étirement, l'adhérence et la cohésion. Sa portée est aussi illimitée et elle peut être attractive ou répulsive. Elle est plus forte que la gravitation.

Loi de Coulomb : Dans le cas deux charges électriques ponctuelles Q_1 et Q_2 , au repos, séparées par une distance r ; elle est donnée par la relation suivante (Charles Coulomb en 1780) :

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{u}_r$$

Dans le cas général, où les charges sont en mouvement, la force qu'elles exercent sur une charge ponctuelle q placée en un point de l'espace est la force de Lorentz :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

3. L'interaction forte

L'interaction forte est responsable du confinement des protons et des neutrons dans les noyaux atomiques. Son intensité est considérable et elle dominerait toutes les autres forces de la nature, son rayon d'action est de l'ordre de la taille du noyau soit 10-15 m. Cela explique que dans un noyau, deux protons, de même charge Q positive, ne soient pas séparés violemment par la force électromagnétique : l'interaction forte est beaucoup plus puissante.

En fait, l'interaction forte s'exerce plus fondamentalement entre les constituants des nucléons : les quarks (et les antiquarks). De la même manière que l'interaction électromagnétique qui n'agit que sur les particules ayant une charge Q non nulle, l'interaction forte n'agit que sur les particules portant une "couleur". La théorie traitant ce mécanisme est la chromodynamique quantique (QCD).



Figure 6 : charge de couleur pour les quarks et antiquarks

Notons que les leptons (électron, muon, tau et leur neutrino) sont insensibles à l'interaction forte. Quant aux quarks, les particules composites qu'ils forment par regroupement s'appellent les hadrons (baryons et mésons) sont aussi sensibles à l'interaction forte et ils ont tous une charge de couleur nulle : ils sont blancs. Les baryons, par exemple, contiennent 3 quarks de couleurs différentes (les nucléons sont des baryons contenant les quarks u et d)

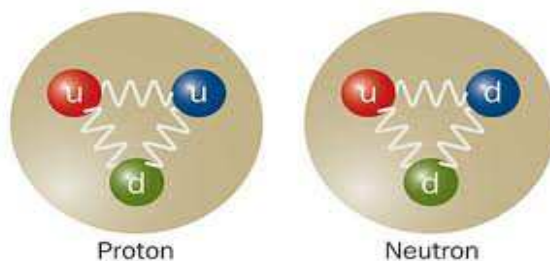


Figure 7: les quarks dans le proton et neutron

4. L'interaction faible

L'interaction faible est l'interaction fondamentale qui a l'intensité la plus faible, sa portée peut être de $10^{-18}m$. Elle est responsable de la désintégration radioactive de particules subatomiques et est à l'origine de la fusion nucléaire dans les étoiles. Elle affecte toutes les particules de matière (quarks, électrons et neutrinos). En particulier, les neutrinos, qui sont électriquement neutres et ne sont sensibles qu'aux interactions faible et gravitationnelle. Par exemple, la désintégration β de la radioactivité naturelle est celle où le neutron ou le proton se désintègrent selon les réactions :

$${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$$

$${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_1e + {}^0_0\nu$$

Où ${}^0_0\bar{\nu}$ est un antineutrino, 0_1e est un antiélectron ou positron.

IV. L'unification des forces.

En physique, on cherche toujours une théorie qui englobe le plus de phénomènes, c'est pourquoi les physiciens ont pensé que ces 4 forces fondamentales résulteraient d'une seule et unique force plus fondamentale encore. De cette idée sont nés les efforts de ces dernières décennies pour unifier les quatre forces comme la Théorie de Grande Unification (T.G.U.), le Modèle Standard, la Théorie des Cordes, etc. Si, effectivement, les forces peuvent s'unifier en une seule alors pourquoi observons-nous quatre forces autour de nous ? C'est qu'en fait, cette force unique a été brisée au cours de l'évolution de notre univers.

Les forces se sont dissociées quand l'énergie a diminué, et on peut retrouver ces unifications en remontant le temps vers l'instant zéro du Big-Bang jusqu'au mur de Planck dont lequel l'énergie est infiniment grande.

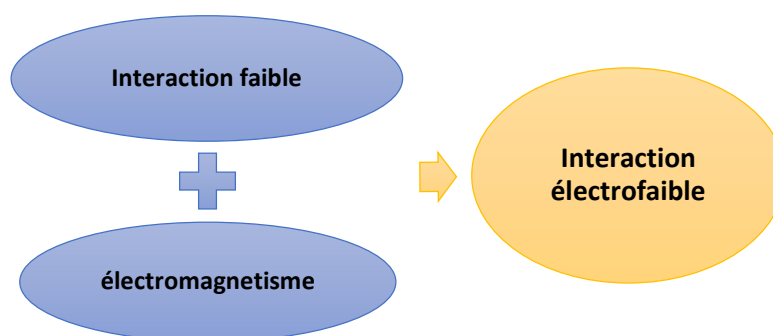
1. Le modèle standard

Le modèle standard de la physique des particules est la théorie actuelle qui permet d'expliquer tous les phénomènes observables à l'échelle des particules. Il englobe donc toutes les particules connues ainsi que les trois interactions agissantes à leur échelle : l'interaction électromagnétique, l'interaction forte et l'interaction faible. Le modèle standard permet, donc, d'expliquer tous les phénomènes naturels sauf la gravitation qui, pour l'instant, résiste aux chercheurs dans le domaine de la physique quantique...

Le modèle standard est une théorie de champs quantique, c'est donc une théorie à la fois quantique et relativiste. Il contient deux interactions distinctes : l'interaction forte expliquée par la chromodynamique quantique (QCD) et l'interaction électrofaible qui est une unification de l'interaction faible et de l'électromagnétisme, dont la théorie de l'électrodynamique quantique (QED) est incluse dans cette interaction. Ces interactions sont expliquées par l'échange de bosons.

2. Unification Electrofaible

Un exemple survenu dans le 19^e siècle, quand il a été réalisé, principalement grâce au travail d'Oersted au Danemark et en Angleterre par Faraday, que l'électricité et le magnétisme sont étroitement liés, et sont des aspects très différents de la force électromagnétique ou l'interaction entre les charges. La synthèse finale a été présentée en 1860 par Maxwell en Angleterre. Son travail prédit l'existence d'ondes électromagnétiques et la lumière a été interprétée comme un phénomène d'ondes électromagnétiques.



En 1979, deux physiciens américains Sheldon Lee Glashow et Steven Weinberg et un physicien pakistanais Abdus Salam reçoivent le Prix Nobel de physique pour leurs travaux théoriques qui unifiaient en 1967 les interactions faibles et électromagnétiques.

Les interactions sont modélisées par les mathématiques sous forme de champ de forces ayant une « symétrie de jauge » qui est un groupe de transformations mathématiques pour lesquelles la dynamique des particules est invariante. Ces physiciens qui ont reçu ce prix Nobel de physique ont démontré que les champs de jauge de l'interaction faible étaient structurellement identiques aux champs électromagnétiques. Or, la symétrie qu'invoque la théorie électrofaible imposerait 4 bosons médiateurs de masse nulle : le photon, Z^0 , W^+ et W^- . Ceci est en contradiction avec les faits. En 1983, Carlo Rubbia a bien découvert au CERN les bosons Z^0 et W prévus par la théorie, mais ces derniers avaient une masse, et même une masse énorme de l'ordre de 90 fois celle du proton !

Afin de donner une interprétation à l'existence de cette masse de ces bosons intermédiaires Z^0 et W de la théorie électrofaible, les physiciens ont supposé l'existence d'un nouveau champ de force appelé champ de Higgs (nom du physicien Peter Higgs) se manifestant par l'intermédiaire d'un mystérieux boson appelé boson de Higgs. Ce champ n'agit qu'avec les bosons Z^0 , W^+ et W^- pour leur donner une masse, mais ne se couple pas avec le photon, préservant ainsi sa masse nulle. Une fois que le champ de Higgs s'est manifesté, les deux interactions électromagnétique et faible, se distinguent l'une de l'autre. Dès lors que ce mécanisme de Higgs est introduit dans les équations, la théorie électrofaible fonctionne parfaitement bien. Elle a permis de prédire, avec précision, la masse des bosons intermédiaires bien avant leur découverte par Rubbia.

3. Comment trouver le boson de Higgs ?

La plupart des particules élémentaires ont été découvertes lors des collisions entre les particules, libérant ainsi de grandes quantités d'énergie capables de créer d'autres particules. En effet, les particules sont accélérées et projetées les unes vers les autres à haute vitesse à l'intérieur des accélérateurs des particules. Les résultats de ces collisions doivent être collectés par des grands détecteurs entourant le point de la collision. Enfin, les données sont recueillies et analysées.

Le boson de Higgs peut être créé au cours de ces collisions, ce dernier est remarquable dans la mesure où ses interactions avec les autres particules leur attribuent leur masse. Ce boson suscite également de l'intérêt parce qu'il s'agit de la dernière particule dans le modèle standard et sa découverte prouverait l'existence du champ de Higgs.

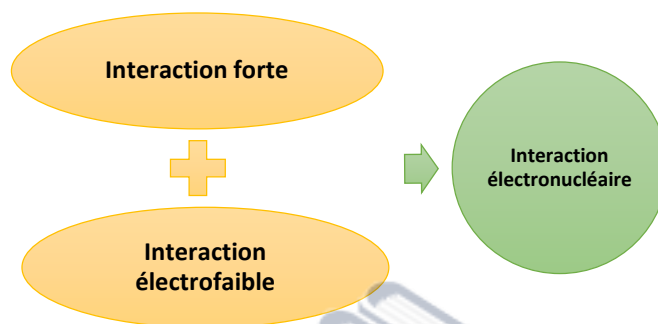
4. Unification électronucléaire

En 1973, Sheldon Glashow et Howard Georgi, proposèrent une nouvelle théorie dite de « Grande Unification » (GUT pour Grand Unified Theory), ne contenant plus qu'une seule interaction : l'interaction électronucléaire.

C'est la théorie du champ fort entre les hadrons qui sont composés des quarks, dont chacun est caractérisé par la charge de "couleur". La chromodynamique quantique fait intervenir des propagateurs ou bosons, particules virtuelles qui transportent d'un quark à un autre la charge de couleur : ce sont les "gluons". Les gluons sont donc les bosons intermédiaires de l'interaction forte entre les quarks. Il existe 8 gluons de couleurs différentes (correspondant à 3 "couleurs" fondamentales, avec 8 manières indépendantes de les combiner deux à deux).

L'idée d'unifier les champs d'interaction a donc connu une deuxième étape ; après les succès de la théorie du champ électrofaible, avec l'extension de celle-ci au champ fort, c'est-à-dire à l'unification du champ électrofaible et de la chromodynamique quantique. Cette unification revient à considérer que tous les "bosons intermédiaires" considérés par ces théories (à savoir le photon, les bosons W et Z et les gluons), sont des états différents d'une même entité fondamentale, en laquelle elles se résolvent sous l'effet d'une puissante symétrie qui fait évanouir leurs différences entre elles.

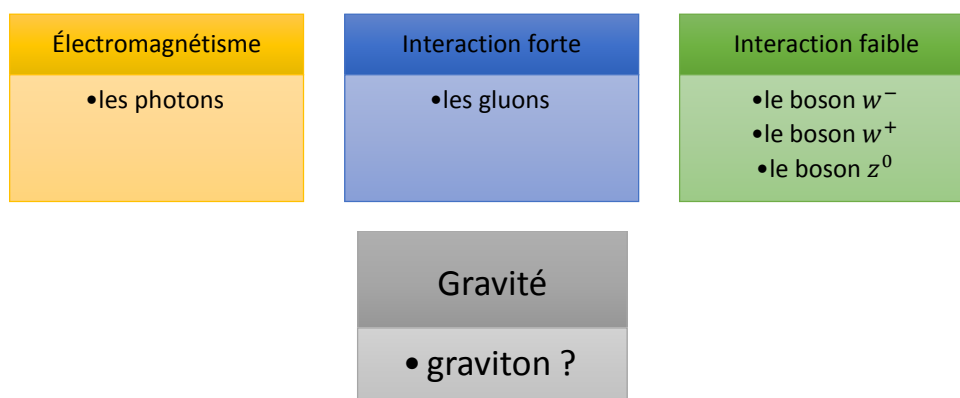
Ces différences se manifesteraient comme des "brisures" de cette symétrie, produites spontanément par des "transitions de phase" affectant les états physiques où les particules élémentaires interviennent, lorsque les énergies en jeu deviennent basses par rapport à celles du domaine où joue la symétrie. De telles transitions de phase se produisent aussi en physique classique : lorsque la température (l'énergie) baisse, la matière à l'état solide passe à l'état liquide. En théorie quantique des champs, les symétries fondamentales sont relatives à une transformation entre les états représentant les systèmes physiques, dite transformation de jauge, dont un exemple simple est bien connu en électromagnétisme classique et quantique. Les théories de jauge sont une extension de cette idée aux "charges" autres que la charge électrique (charge "faible", et "couleur").



Dans le modèle standard, la mécanique quantique suppose qu'il existe des particules messagères qui sont responsables des 3 forces fondamentales. Alors qu'il n'arrive pas à décrire la particule qui transmet la gravitation.

5. Les particules messagères de chaque force

Après l'élaboration d'une théorie de grande unification, la dernière étape dans la quête d'une vision unifiée des forces fondamentales serait une « Théorie de Tout » unifiant la gravité et les trois autres interactions. Cette dernière étape est la plus difficile, car elle bute sur un obstacle majeur : l'incompatibilité de la relativité générale et de la mécanique quantique. La relativité générale d'Einstein traite de l'espace-temps et la gravitation et suppose en particulier que l'espace et le temps sont continus. La mécanique quantique décrit, quant à elle, le comportement des particules et a introduit le concept de quantification comme par exemple l'énergie des particules est discrète. C'est là où se trouve le cœur du problème : comment réconcilier continuité et quantification ?



Pour cela, il existe des théories qui semblent pouvoir apporter les meilleures solutions.

Chapitre 2 : Qu'est-ce que c'est la théorie des cordes.

I. La théorie des cordes classique

1. Critique du Modèle Standard

Le Modèle Standard des particules est couramment utilisé aujourd'hui, et donne des résultats extrêmement bons comparés à l'expérience. Il décrit les particules élémentaires et leurs interactions, à l'exception de la gravitation. Chaque particule y est décrite par quelques paramètres : la masse, la charge électrique, la charge leptonique, le spin... Au total, il comporte ainsi 19 paramètres. Ces paramètres font partie de la théorie, mais celle-ci n'en fixe pas les valeurs. Ce sont des paramètres libres, dont les valeurs sont déterminées expérimentalement.

Cette liberté laissée aux valeurs des masses, en particulier, indique que la théorie n'est pas unique ! On pourrait en fait créer une série des théories ayant tous les mêmes principes, mais des valeurs différentes pour les masses. Il semble que par cet aspect le Modèle Standard ne soit pas une théorie bien finie.

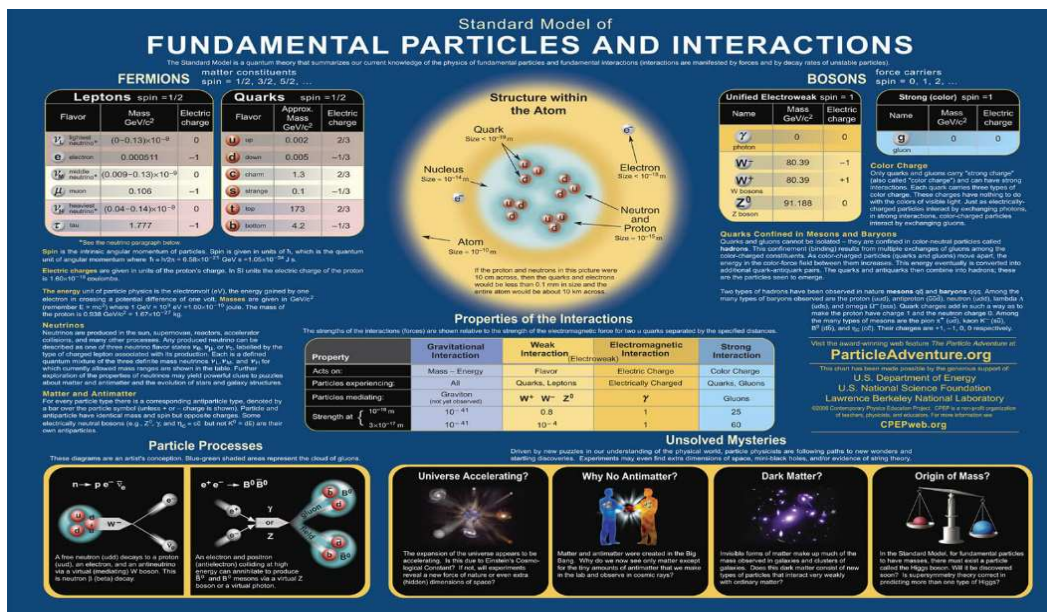


Figure 8 : classification du particule selon le modèle standard

La gravitation n'en faisant pas partie, la théorie est, en plus, incomplète. Elle ne peut décrire tout l'univers, mais seulement certains de ses aspects, ceux dans lesquels la gravitation est négligeable devant les autres forces. Ce qui en fait malgré tout une théorie fort utile, car la gravitation est 1040 fois plus faible que l'interaction électromagnétique, dans les conditions qui règnent aujourd'hui à peu près partout dans l'Univers (sauf peut-être dans les trous noirs). Mais ce manque est crucial si l'on veut expliquer une phase chaude de l'Univers à ses débuts : le Big Bang. La densité est alors telle que la gravité, par addition, devient aussi forte qu'es autres interactions.

Le Modèle Standard donne donc des résultats utiles pour l'immense majorité des applications qu'on peut en attendre, mais il pêche dans des cas très particuliers. Ce qui peut laisser penser que certains phénomènes qui se produiraient dans ces circonstances-là ne seraient pas prédictibles.

Le Modèle Standard décrit les particules élémentaires comme étant ponctuelles. Les diagrammes de Feynman représentent les différentes interactions possibles. L'ennui est qu'il y en a plusieurs, beaucoup, pratiquement une infinité... Si on fait la somme de toutes ces possibilités, on tombe sur des valeurs infinies. Or parmi elles, il y en a de simples, dont la probabilité de réalisation est élevée, et d'autres bien plus complexes, mettant en jeu de nombreuses particules intermédiaires, et dont la probabilité est faible. Pour ne pas prendre en compte, négligé, ces possibilités qui ne se réalisent presque jamais, les physiciens ont défini la méthode de renormalisation. Cette méthode s'applique très bien pour l'électromagnétisme, les interactions forte et faible, mais pas pour la gravité. On dit que celle-ci est non renormalisable. Et de là vient l'impossibilité actuelle de l'inclure dans le Modèle Standard.

L'aspect ponctuel des particules dans le Modèle Standard semble donc à l'origine de bien des problèmes. La Théorie des cordes remplace les particules ponctuelles par des cordes ayant une longueur, et c'est là l'idée de base.

2. L'émergence de la théorie des cordes

La première idée est venue à Gabriele Veneziano. Il travaillait sur l'interaction forte, et se heurtait, comme ses collègues, à des problèmes insurmontables. Un jour, il a constaté une similitude mathématique entre ces problèmes et une fonction bien connue, la fonction β imaginée par Euler deux siècles plus tôt. Les solutions de cette fonction représentaient bien les résultats qu'il cherchait à interpréter. Mais sa signification physique n'apparaissait pas.



Figure 9 : Gabriele Veneziano

Il a fallu attendre 10 ans avant qu'émerge une interprétation, et c'est l'origine des cordes : les particules élémentaires ne seraient plus ponctuelles, mais seraient d'infinitésimales cordes. Cette interprétation est due à Yoichiro Nambu, Holger Nielsen, Leonard Susskind. Si ces cordes étaient très petites, elles pourraient, dans l'état de nos instruments actuels, nous apparaître ponctuelles. Ce qui justifierait qu'on ne les ait pas découvertes expérimentalement. Les interactions entre ces cordes seraient représentées par la fonction β d'Euler.

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt$$

Une fois l'idée de base lancée, il a fallu la mettre en pratique, et développer une véritable théorie. Et là, les difficultés se sont accumulées. Il a fallu peu de temps pour que des résultats expérimentaux viennent mettre en échec ces développements. Pendant ce temps-là, la chromodynamique quantique remportait tous les succès ! Rappelons qu'elle traite justement de l'interaction forte, que voulait résoudre également la théorie des cordes. Cette dernière a été abandonnée... Presque.

Sans trop anticiper sur la description de la théorie, on peut dire que les cordes sont les constituants élémentaires, et que les particules que nous connaissons sont des états de vibration de ces cordes. Une même corde, vibrante à des énergies différentes, peut apparaître sous la forme de particules différentes. Les gluons, qui caractérisent l'interaction forte, sont ainsi représentés. Mais les

cordes ont d'autres modes, qui pouvaient s'interpréter comme des bosons, mais ne correspondaient pas à l'interaction forte. Ceci était un défaut rédhibitoire de la théorie, mais il a tourné à son avantage lorsqu'on s'aperçut qu'ils correspondaient en fait au graviton... Tout au moins au graviton théorique, puisqu'il n'a pas encore été observé. On sait que les ondes gravitationnelles, portées par le graviton, ont été observées indirectement par l'augmentation de la période du pulsar binaire. Mais le graviton n'est pas connu expérimentalement.

Ainsi, une théorie faite pour expliquer l'interaction forte dans un cadre quantique, se trouve contenir, presque par accident, les éléments de la gravitation. C'était vraiment un atout très fort. Restait à le conforter par un développement harmonieux.

Échaudé par les multiples tentatives antérieures qui avaient lamentablement échoué, les physiciens n'ont pas cru à cette nouvelle approche. Et dans les années 80, on a même trouvé des incompatibilités entre la Théorie des Cordes et la Mécanique Quantique. En 1984, les problèmes ont soudain été résolus, par Green et Schwarz. Et mieux encore, ils ont montré que la théorie pourrait expliquer non seulement la gravité et l'interaction forte, mais aussi, tant qu'à faire, l'interaction faible et l'électromagnétisme.

Cet aspect universel de la théorie a emporté l'adhésion de nombreux physiciens, qui ont travaillé activement. Mais les calculs sont difficiles. Pire même, car les physiciens ont l'habitude des calculs pénibles, tirés d'équations bien connues. En Théorie des Cordes, les équations ne sont connues qu'approximativement ! En 95, Edward Witten a annoncé une nouvelle approche pour améliorer les équations et les calculs correspondants. Mais près de 20 ans plus tard, la situation n'est pas vraiment débloquée.

3. Définition des cordes

Les cordes seront supposées élémentaires, en ce sens qu'elles n'ont pas de structure, elles ne peuvent pas être décomposées en entités plus petites. Plus petites que la longueur de Planck serait d'ailleurs difficile à envisager...

Les cordes ont une longueur fixe, et vibrent selon des modes définis par la longueur, tout comme une corde de violon. Les différents modes de vibration, donc d'énergie, de ces cordes définissent les masses et les charges des particules.

Ainsi, toutes les particules que nous connaissons seraient en fait identiques dans leur structure, toutes formées d'un même type de corde, mais vibrant différemment. Comme pour une corde vibrante de violon, l'intensité du son correspond à l'intensité de l'excitation. C'est une énergie d'autant plus grande. Et puisque l'énergie correspond à la masse ($E = mc^2$), à chaque mode de vibration correspond donc une masse. Par conséquent, les masses auraient une explication !

4. Masses et tension des cordes

Les masses posent cependant un problème. Si la longueur des cordes est la longueur de Planck, leur énergie quantique (due au principe d'incertitude), doit être de l'ordre de l'énergie de Planck. Convertie en masse, c'est la masse de Planck. Or celle-ci est absolument énorme : 1019 fois, la masse du proton... C'est la masse d'un grain de poussière. Mais encore une fois, un phénomène sauve la situation. Les fluctuations quantiques des cordes leur confèrent une énergie négative ! Et la compensation pourrait se faire. Et elle se fait effectivement, comme l'ont démontré Scherk et Schwartz. Elles se compensent même exactement pour le graviton, qui de ce fait a une masse nulle.

Pour vibrer, les cordes doivent être en tension, comme une corde de piano. Mais cette tension est énorme. Et les modes de vibration possibles en nombre infini. Les particules que nous connaissons, dont la masse est minuscule par rapport à la masse de Planck, sont donc les modes les plus calmes. Et il devrait exister d'innombrables particules de grande masse, correspondant aux modes de grande énergie. Il est évident que nos accélérateurs de particules sont infiniment loin de pouvoir créer de telles particules. Existent-elles réellement ? L'énergie nécessaire pour les créer était disponible un instant après le Big Bang. Il devait donc y en avoir. Mais leur grande masse les rend instables, et elles ont dû se désintégrer en une myriade de particules plus légères, celles que nous observons.

5. Compatibilité de la Relativité et de la Mécanique Quantique

Le problème d'incompatibilité entre ces deux théories provient de leur description de l'espace. Pour la Relativité, l'espace-temps est continu, lisse. Pour la Mécanique Quantique, à très petite échelle, vers la longueur de Planck, l'espace-temps lui-même perd cette continuité et devient fluctuant. C'est la source des problèmes entre les deux descriptions du monde. La Théorie des Cordes ne présente pas ce problème, pour une raison d'échelle.

Pour sonder la matière et en découvrir la structure, nous utilisons des accélérateurs, qui projettent des électrons ou des protons à très grande énergie. Plus l'énergie est grande, plus la longueur d'onde de de Broglie associée à la particule est petite. C'est ce qui fait qu'elles nous permettent de voir des détails aussi petits que leur longueur d'onde elle-même, d'autant plus petite que leur énergie est plus grande. Les particules dans le Modèle Standard étant ponctuelle, il n'y a pas de limite inférieure réelle pour sonder la matière.

Avec les cordes, le problème est radicalement différent. Les cordes ont une longueur finie, et même en augmentant leur énergie on sera limité par leur longueur, qui ne permettra jamais de sonder à plus petite échelle. Mais si la Théorie des Cordes représente vraiment le Monde, alors rien ne permet de voir à plus petite échelle. Par conséquent, les fluctuations quantiques de l'espace-temps, qui sont à plus petite échelle, sont invisibles à toutes les particules, et le problème ne se pose tout simplement pas.

6. Les symétries et le spin

De nombreux phénomènes physiques admettent une symétrie. La plus évidente est la rotation : une sphère peut être tournée dans tous les sens, elle reste identique à elle-même. Plus subtile, la symétrie temporelle des lois de la Mécanique.

La relation fondamentale de la mécanique, $\sum \vec{F} = m \frac{d^2 \vec{OM}}{dt^2}$ ne change pas si on change t en $-t$. Autrement dit, si on fait passer le film à l'envers, on voit les objets suivre la même trajectoire, mais dans l'autre sens. La physique regorge de symétries, et l'on peut même dire qu'aujourd'hui, elles sont à la base des théories.

Le Modèle Standard des particules n'échappe pas à la règle. Il présente de nombreuses symétries, qui correspondent à des lois de conservation. Mais tout n'y est pas symétrique. Les particules se divisent bien en deux camps : les fermions et les bosons. Entre les deux, un mur.

Certains physiciens sont allés au-delà de ce qu'affirme ce modèle, et ont ajouté une nouvelle symétrie : celle qui permet d'échanger les bosons et les fermions. Si elle est vraie, cette symétrie permet à un boson de devenir fermion par une désintégration, et réciproquement. Un petit problème :

aucun fermion connu ne correspond à un boson connu... De même dans l'autre sens d'ailleurs. Alors, pour admettre cette nouvelle symétrie, il faut accepter de doubler la ménagerie des particules !

Les deux physiciens hollandais Uhlenbeck et Goudsmit ont, en 1925, réfléchi sur le magnétisme associé à l'électron. Dans la théorie de Maxwell, le magnétisme naît du mouvement de charges électriques. L'électron possède bien une charge, il lui manquait le mouvement. C'est le spin qui y pourvoit. Le spin est une sorte de rotation sur lui-même de l'électron, propriété quantique puisque l'électron est une particule ponctuelle. Défini pour l'électron, le spin a vite été étendu à toutes les particules matérielles, qui ont un spin de $+1/2$. Ensuite, ce sont les particules d'interaction qui ont été dotées d'un spin, mais il est entier, de valeur $+1$. Sauf le graviton, dont le spin vaut $+2$.

Dans la théorie des cordes, il est apparu un état de vibration qui correspond à une particule de masse nulle et de spin $+2$, ce qui permet de dire qu'elle contient la gravitation. Une désintégration permet de transformer une particule lourde en une particule plus légère. Ce qui est vrai de la masse le serait-il du spin ? Dans le Modèle Standard, ce n'est pas pris en compte. Mais certaines théories introduisent une nouvelle symétrie, qui permet de passer d'un spin à un autre, d'un demi-entier caractérisant les fermions à un entier caractérisant les bosons. Ceci est la supersymétrie. La Théorie des cordes l'a incorporée, dans sa version Supercordes.

7. Avantages et problèmes

Le premier avantage de cette théorie est évident. C'est la fin du zoo de particules. Au lieu d'avoir une pluralité de particules, on a plus qu'un seul type d'objet : une corde.

Un autre avantage est l'absence de renormalisation. En effet, une étude attentive des singularités ultraviolettes montre que leur apparition est due à la nature ponctuelle des particules. Cela n'est pas surprenant, une particule ponctuelle est une singularité dans l'espace-temps et toute singularité a tendance à provoquer ce genre de désagrément.

Les cordes ayant une extension spatiale, elles ne provoquent pas l'apparition de singularités ultraviolettes. C'est un avantage considérable. En effet, non seulement on peut se passer de renormalisation, mais en plus on ne risque pas de tomber sur une théorie non renormalisable !

Une autre facilité se révèle lors de l'application de la théorie des perturbations. Les règles de Feynman pour les cordes conduisent à une diagrammatique particulièrement simple.

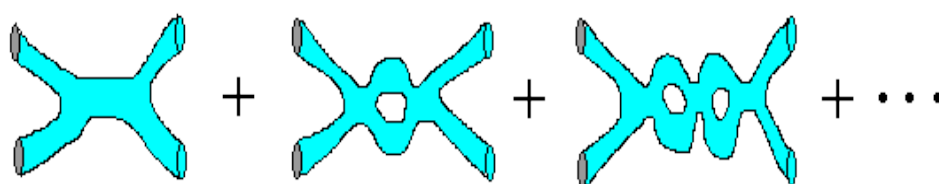


Figure 10

Malgré la complexité de la théorie, on a au moins une simplification, et pas des moindres. Au lieu d'avoir un nombre considérable de diagrammes lors de l'augmentation du nombre de boucles, avec les cordes le nombre de diagrammes reste faible.

La mise en équation de la théorie montre que des inconsistances peuvent exister sauf si l'on travaille dans un espace-temps avec 26 dimensions ! 25 dimensions spatiales et une de temps. La norme des états est liée aux amplitudes que nous avons vues, qu'elles soient négatives implique des probabilités négatives, ce qui est gênant ! On montre que lorsque l'on sélectionne les états physiques

parmi tous les états théoriques, les états à norme négative ne disparaissent tous que si l'on travaille à 26 dimensions.

Pour les théoriciens c'était très excitant. C'était la première fois que l'on trouvait une théorie imposant le nombre de dimensions pour des raisons de consistance. En effet, dans toutes les autres théories le nombre de dimensions était imposé. On pouvait faire varier le nombre de dimensions mais sans rencontrer d'inconsistances. On pouvait parfois tomber sur des théories non renormalisables, mais celles-ci ne sont pas inconsistantes, c'est à dire ne possèdent pas de contradictions internes, elles sont seulement inutilisables en pratique à cause du nombre infini de paramètre libres. Ici, le nombre de dimensions est une conséquence de la théorie.

Il est également possible d'étudier les propriétés des particules. C'est à dire des différents modes de vibration des cordes. Le mode le plus simple s'appelle tachyon, nous allons y revenir. Le mode suivant est une particule de masse nulle et spin 2.

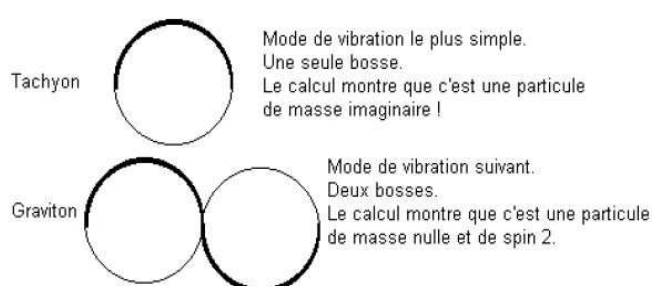


Figure 11 : le tachyon et le graviton

Mais une particule de masse nulle et de spin 2, c'est le graviton. Et si cela nous donnait une possibilité d'unification de la gravité avec les autres théories quantiques ? Là aussi pour la première fois, le graviton apparaissait comme une conséquence de la théorie sans que l'on doive l'introduire de manière "artificielle" (en choisissant les groupes de symétries par exemple). Mais la théorie ne possède pas que des avantages.

Le premier ennui, grave, est le tachyon. Celui-ci correspond à une particule de masse imaginaire ! De plus, il se déplace à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Le tachyon, est donc un objet non physique. Que la théorie prédise son existence est évidemment assez grave.

Un autre ennui est le nombre de dimensions nécessaires à la théorie : 26. Ce nombre semble absurde. Malgré l'excitation d'avoir trouvé une condition imposant le nombre de dimensions, on aurait préféré trouver 4. Pourquoi ce nombre aussi élevé ?

Enfin, malgré sa diagrammatique simple et l'absence de renormalisation, la théorie reste complexe à manipuler mathématiquement. De plus, la théorie ne semblait pas pouvoir reproduire le monde réel. On ne retrouvait pas les particules existantes (le zoo). Par exemple, la théorie ne contient pas de fermions, donc pas de matière !

Notons enfin, que même si les divergences traditionnelles ne se produisent pas, d'autres divergences peuvent apparaître. En effet, les cordes sont des objets plus complexes que des particules ponctuelles. Une corde est constituée d'une infinité de points. Elle peut se tordre ou se courber d'une infinité de manière différente ; une corde a une infinité de degrés de liberté. Ces infinités de contorsions peuvent en retour provoquer l'apparition d'infinis dans les calculs. Mais ils peuvent être

contournés. L'apparition de ces divergences est évidemment aggravée si l'on emploie des objets encore plus complexes comme des membranes, d'où la préférence pour des cordes.

II. La première révolution

1. La super symétrie

C'est ce principe qui a transformé la théorie dite "des cordes" en celle des "supercordes". Le but de la supersymétrie est de placer sur un même plan les fermions (matière) et les bosons (rayonnement). On ne sait pas trop si l'univers est organisé ainsi, mais cela permettrait d'éclaircir de nombreux mystères. Pour réaliser ce tour de force, il est nécessaire de doubler voir plus le nombre de particule existantes. Et pour permettre l'existence de ces nouveaux venus, il faut de l'espace, et donc de nouvelles dimensions ! Ce qui aboutit alors à un Univers à 11 dimensions : 1 de temps, 3 d'espace que nous connaissons, et 7 que nous n'avons pas encore observées... Comment est-ce possible ? La réponse est que ces dimensions seraient enroulées sur elles-mêmes à très petite échelle (encore celles de la longueur de Planck $l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.616 \cdot 10^{-35} m$).

Les cordes étant de la même taille, elles leur seraient accessibles. Quant à nous, nos expériences ne permettent pas de faire des mesures à ce niveau.

Les théories supersymétriques ont donc prévu de nouvelles particules. Et pour les nommer, on utilise une méthode systématique. Le nom des superpartenaires des fermions (électron, quarks, neutrinos de spin $+1/2$) se forme en ajoutant un 's' initial au nom du fermion. Le superpartenaire de l'électron est donc le sélectron, celui du quark est le squark, celui du neutrino le sneutrino. Ils sont de spin 0. Pour les bosons, on utilise le suffixe 'ino' ajouté au nom du boson. Le superpartenaire du photon est le photino, celui du gluon est le gluino. Les bosons intermédiaires Z et W donnent le zino et le wino. Aucune des superparticules n'a encore été découverte.

Quelle est la pertinence de cette supersymétrie ? On peut dire qu'elle est mathématiquement nécessaire, mais la nature n'est peut-être pas forcée de suivre les mathématiques... Mais physiquement, le Modèle Standard est difficile à maîtriser à cause de fluctuations quantiques, qui produisent des effets parfois énormes, non observés. Or la supersymétrie, par des échanges entre bosons et fermions, calme le jeu. Le Modèle Standard Supersymétrique est donc plus stable que son ancêtre.

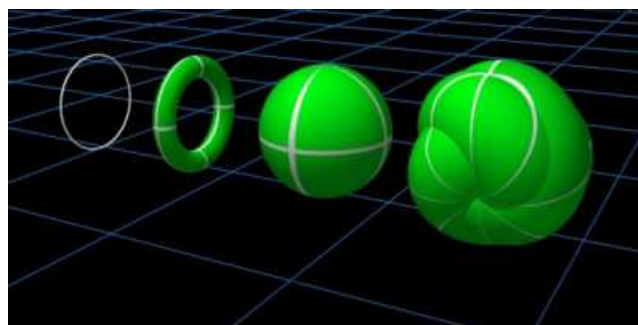


Figure 12

Enfin, l'unification des forces est prévue par la mécanique quantique, en considérant les fluctuations qui se produisent à proximité d'une particule (création-annihilation de paires). Mais elle ne se produit que deux par deux. Par contre, la supersymétrie, là encore, lisse le processus et produit une véritable unification.

Les calculs faits sur les superpartenaires indiquent que leurs masses doivent être très élevées, mille fois plus que le proton. Et nos accélérateurs n'atteignent pas cette zone, ce qui explique que les superparticules n'aient pas été observées jusqu'à maintenant.

2. Théorie de Kaluza-Klein

En 1919, Theodor Kaluza, mathématicien polonais, a imaginé un univers dans lequel il n'y aurait pas 3, mais 4 dimensions d'espace... Mathématiquement, c'est parfaitement possible. Voyons pourquoi :

Considérons un espace à une seule dimension. C'est une ligne droite toute simple, sur laquelle on peut aller dans un sens ou dans l'autre. Il est assez naturel d'orienter la droite, pour savoir dans quel sens on se déplace. Alors, un déplacement dans le sens du droit est positif, dans le sens inverse il est négatif. Sur cette droite, on peut définir des longueurs, d'un parcours par exemple. Si on se déplace dans le bon sens, le sens positif, la longueur du parcours est la différence entre les positions de l'extrémité et de l'origine. Mais dans le sens inverse, cette différence est négative. Prenons le carré pour avoir toujours un nombre positif.

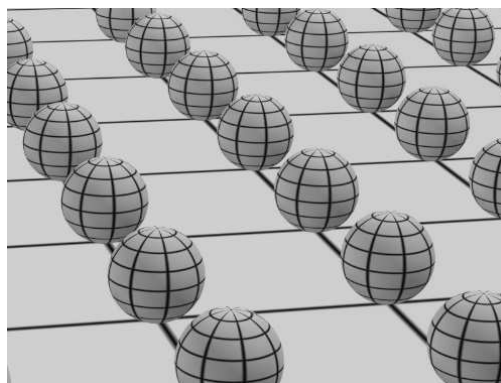


Figure 13 : les particules selon Kaluza-Klein

Passons à deux dimensions. On a maintenant une surface, comme une feuille de papier. Il faut deux axes pour indiquer la position d'un point quelconque. Et pour définir la longueur d'un segment, on utilise le théorème de Pythagore $l^2 = x^2 + y^2$. Il donne comme précédemment le carré de la longueur.

En compliquant un peu plus, on passe à trois dimensions. On projette le segment à mesurer sur le plan (X, Y). Dans ce plan, la longueur de la projection est $l_{XY}^2 = x^2 + y^2$. Et la longueur du segment donné, par une seconde application du théorème de Pythagore, est $l^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Pour ces trois dimensions d'espace, le carré de la longueur d'un segment est donc toujours la somme des carrés des projections du segment sur les axes.

Pourrait-on imaginer un espace à 4 dimensions ? Pourrait-on y mesurer la longueur d'un segment ? Oui, en procédant tout simplement par analogie. On pose que la longueur d'un segment est $l^2 = x^2 + y^2 + z^2 + t^2$. Si on veut que les axes soient orthogonaux, il faut analyser ce que signifie cette propriété. Deux axes sont perpendiculaires si le produit scalaire de leurs vecteurs unités est nul. Il suffit de définir un produit scalaire en dimension 4 pour satisfaire cela.

Avec ces outils mathématiques, on est donc capables de construire, mathématiquement, des espaces de dimension quelconque (même infinie, mais oui...).

Kaluza a défini un espace un peu particulier, car il est évident pour tout le monde que notre espace physique n'a que trois dimensions d'espace, pas une de plus. Pourtant, imaginez qu'il existe une quatrième dimension, mais toute petite, enroulée sur elle-même. Tellement petite, que nos moyens physiques ne nous permettent pas de la distinguer. C'est un peu difficile à imaginer bien sûr, mais c'est envisageable. Un tel espace physique n'apporterait pas de contradiction.

L'image classique est celle de la fourmi qui marche sur un long tuyau d'arrosage. Vu de loin, le tuyau paraît un fil, unidimensionnel. Il faut le voir de près pour s'apercevoir qu'il présente une

seconde dimension enroulée, sur laquelle la fourmi, à la même échelle, est capable de tourner. C'est quelque chose comme ça que les particules élémentaires pourraient ressentir.

Kaluza a suggéré que l'ajout d'une dimension permettrait d'unifier la Relativité Générale avec l'électromagnétisme. Une telle performance justifiait que l'on s'intéresse de près à la question. On nomme Théorie de Kaluza-Klein toute théorie qui explique la physique dans un espace à plus de 3 dimensions.

En ajoutant une dimension à un espace, on ajoute des libertés. Comme la fourmi qui peut faire le tour du tuyau, les particules peuvent maintenant s'offrir de petites incursions dans un nouvel espace. Kaluza a réécrit les équations de la Relativité Générale, mais la quatrième dimension a produit, obligatoirement, de nouvelles équations. Il faut bien décrire ce qu'il se passe dans cette extension de l'espace. Et la surprise a été que les équations ajoutées étaient identiques aux équations de Maxwell de l'électromagnétisme.

Relativité Générale + quatrième dimension = Relativité Générale + électromagnétisme.

Ainsi, cette modification de l'espace permet de décrire simultanément deux théories majeures de la physique. La gravitation provient des dimensions habituelles, et l'électromagnétisme découle de la quatrième.

Les problèmes sont pourtant arrivés peu après. Les prédictions de cette théorie pour la masse et la charge de l'électron ne correspondaient pas avec les observations. Celles-ci devaient avoir raison ! Les physiciens se sont tournés vers d'autres problèmes. Jusqu'aux années 80.

Les interactions faibles et fortes étaient inconnues lors du travail de Kaluza. Alors, on a pensé que c'était la cause des problèmes de la théorie. Il était temps de la ressortir de la naphtaline. Et puisqu'une dimension de plus permettait de décrire une interaction, il suffisait d'en rajouter encore pour décrire les autres !

Mais attention ! Les nouvelles dimensions, comme celle de Kaluza, doivent être enroulées et microscopiques. Et présentes en chaque point de l'espace. En chaque point, il faut imaginer qu'il y ait plusieurs dimensions enroulées...

3. La théorie des supers cordes

L'introduction de la super symétrie dans la théorie des cordes eut lieu à la charnière 1984 - 1985. Elle fut appelée la première révolution. La théorie des cordes super symétriques, ou théorie des supers cordes, offre de nombreux avantages. En effet, la plupart des problèmes rencontrés disparaissent automatiquement !

Le premier avantage est la disparition des tachyons. Ceux-ci peuvent être reliés au principe d'incertitude. Nous avons vu que ce principe interdit l'existence d'un vide absolu. Il y a toujours des fluctuations. En fait, le principe d'incertitude interdit, pour un système quelconque, d'avoir une énergie minimale nulle. Il y a toujours une énergie résiduelle appelée énergie de "point zéro". Les tachyons, mode de vibration le plus bas, ne sont rien d'autre que cette énergie de point zéro. Dans une théorie des cordes super symétriques, les modes de point zéro des fermions et des bosons se compensent et les tachyons disparaissent.

Le point zéro, c'est à dire le mode d'énergie le plus bas, devient le mode suivant qui est le graviton. Celui-ci est donc conservé par la théorie ce qui est tout à fait satisfaisant. N'oublions pas que la théorie des cordes est renormalisable. Nous voilà donc avec une théorie de super gravité

renormalisable. Quel succès. Le deuxième avantage est une conséquence évidente de la super symétrie. Les fermions font leur apparition. Nous avons vu que la théorie classique ne contenait que des bosons. Mais la super symétrie reliant les bosons et les fermions, ces derniers surgissent donc naturellement. Il est donc peut-être possible de retrouver un spectre de particules tel que celui du modèle standard expliquant le zoo.

Enfin, les conditions de consistance de la théorie, c'est à dire le respect de l'invariance de Lorentz et la nécessité d'avoir des états de norme positive, conduit à une contrainte différente sur le nombre de dimensions. Celui-ci est maintenant de 10. C'est déjà beaucoup mieux que 26 ! Il n'y a plus que 6 dimensions à enrouler. Le seul défaut est justement ce nombre de 10 dimensions. Nous avons vu qu'une super gravité nécessite d'avoir 11 dimensions. Il en manque une ! Mais ne nous formalisons pas pour si peu. On a déjà tellement progressé. Continuons pour voir si ce problème ne va pas se résoudre.

La théorie des supers cordes permet également de construire plusieurs théories différentes que nous allons décrire. Il faut préciser que cela ne suit pas totalement la ligne historique. Tout s'est déroulé en seulement quelques années dans une explosion d'idées et de résultats mathématiques. En particulier, ce qui suit chevauche partiellement la seconde révolution qui sera présentée plus loin. Mais la courte durée de cette période rend impossible un suivi strictement historique sans nuire à la clarté de l'exposé.

On peut déjà séparer les théories en deux grandes classes selon que l'on a des cordes ouvertes ou fermées. En fait, la présence de cordes ouvertes implique automatiquement celle de cordes fermées car les cordes ouvertes peuvent interagir pour fusionner.

Les théories se divisent donc en :

- théories avec uniquement des cordes fermées
- théories avec des cordes ouvertes et des cordes fermées

La théorie des supers cordes présentait des anomalies dites gravitationnelles et des anomalies dites de Yang et Mills. Mais Green et Schwarz découvrirent que ces anomalies disparaissaient si le groupe de jauge utilisé était ou $SO(32)$ ou $E(8) \times E(8)$. Ce qui limite singulièrement le nombre de théories possibles.

Les théoriciens découvrirent ainsi une théorie consistante baptisée théorie de type I. Basée sur des cordes ouvertes.

Ils découvrirent également deux théories avec des cordes fermées, appelées théories de types IIA et IIB.

Gross, Harvey, Martinec et Rohm découvrirent les cordes hétérotiques hybrides (fermées) avec le groupe $E(8) \times E(8)$. Et ont découvert également une théorie hétérotique avec le groupe $SO(32)$.

Les cordes fermées admettent des vibrations se déplaçant à gauche ou à droite.

Les vibrations peuvent se déplacer dans les deux sens indépendamment. La super symétrie peut donc être attribuée à seulement un sens. D'où le nom d'hybride puisqu'un sens est super symétrique tandis que l'autre sens est classique.

Il semble en l'état actuel des choses que ce soient les seules théories possibles mais ce n'est pas démontré. Les théories peuvent donc se regrouper dans un tableau.

Nom	Type des cordes	Graviton	Symétrie (de jauge)	Super Symétries	Parité
Type I	Ouvertes et fermées	Oui	SO(32)	1	Violée
Type IIA	Fermées	Oui	Non	2	Conservée
Type IIB	Fermées	Oui	Non	2	Violée
Hétérotique SO(32)	Fermées	Oui	SO(32)	1	Violée
Hétérotique E(8)×E(8)	Fermées	Oui	E(8)×E(8)	1	Violée

Décrivons maintenant ces théories plus en détail.

4. Théorie de type I

La théorie de type I contient le graviton ainsi que des bosons de jauge correspondant aux bosons intermédiaires (de l'interaction faible), le photon et les gluons. Ainsi que les super partenaires correspondants.

Cette théorie contient aussi des fermions qui peuvent interagir avec les bosons de jauge. Ils portent ainsi des charges.

Tout cela est encourageant et permet d'espérer retrouver toutes les interactions habituelles. Malheureusement le groupe $SO(32)$ est beaucoup trop large. Il inclut bien les interactions habituelles, dérivant du groupe $SU(3) \times SU(2) \times SU(1)$, mais il implique aussi l'existence d'interactions supplémentaires qui ne sont évidemment pas observées.

Il y a aussi d'autres problèmes. Ainsi la théorie est à 10 dimensions. Et rien ne semble induire automatiquement un enroulement des six dimensions supplémentaires. Pire encore, les particules sont toutes sans masse !

Il semble donc que cette théorie ne puisse pas réellement correspondre au monde réel. Toutefois, à très haute énergie les particules se comportent comme des particules sans masse. Cette théorie pourrait donc, éventuellement, être une candidate pour une théorie limite s'appliquant à haute énergie.

5. Théories de type II

Ces théories possèdent des gravitons et des fermions. Malheureusement la situation est encore pire qu'avec la théorie de type I. En effet, ces théories ne portent pas de groupe de jauge et ne possèdent donc pas de bosons de jauge ! Donc, elle ne prédit pas le photon et les autres bosons porteurs des interactions. C'est la situation inverse de la théorie des cordes classiques, cette fois nous avons de la matière mais pas d'interaction.

Comme les fermions ne peuvent pas réagir entre eux (via les bosons de jauge), ils ne portent pas de charge.

Il y a bien un champ bosonique tensoriel, analogue au photon mais décrit par un tenseur au lieu d'un vecteur, mais il n'interagit pas avec les fermions qui ne peuvent donc pas porter de charge vis à vis de ces bosons. Ce champ ne véhicule donc pas une interaction.

Ces théories semblent donc, à priori, très éloignées du monde réel. Elles furent pendant longtemps considérées comme exotiques.

6. Théories hétérotiques

Avec les théories hétérotiques un problème d'un tout autre genre se pose. Comme la super symétrie est imposée à un sens des vibrations, alors la consistance impose que les cordes soient plongées dans un espace-temps à 10 dimensions. Mais l'autre sens ne possède pas la super symétrie. Les cordes doivent donc être dans un espace-temps à 26 dimensions comme pour les cordes classiques ! Cela pose évidemment un gros problème.

Heureusement, le mécanisme de Kaluza - Klein vient à notre secours. Il suffit de prendre un espace-temps à 26 dimensions puis d'enrouler complètement 16 des dimensions supplémentaires pour retrouver un espace-temps à 10 dimensions.

Cet enroulement à même d'autres avantages. Il introduit des degrés de libertés supplémentaires qui se traduisent par l'apparition de bosons de jauge qui étaient normalement absents dans les théories avec des cordes fermées (comme les théories II). Ces degrés de libertés suivent des symétries internes selon le groupe $SO(32)$ ou $E(8) \times E(8)$.

Le fait d'avoir la super symétrie pour un seul sens est ennuyant car l'équilibre entre les fermions et les bosons (l'équilibre avec les super partenaires) n'est plus restauré. Il manque des fermions. Or cet équilibre est indispensable à la renormalisabilité de la théorie. A nouveau, l'enroulement des 16 dimensions nous aide car il restaure l'équilibre entre les fermions et les bosons.

Les théories suivant le groupe $SO(32)$ ont un phénomène déplaisant. Lorsque l'on enroule spontanément les 6 dimensions pour revenir à l'espace-temps habituel à quatre dimensions, l'invariance sous la parité est restaurée ! Elles ne peuvent donc décrire correctement l'interaction faible.

Par contre, les théories avec le groupe $E(8) \times E(8)$ conservent cette propriété cruciale (ainsi que la théorie IIB d'ailleurs).

Les théories avec le groupe $E(8)$ sont, de plus, beaucoup plus intéressantes vis à vis des interactions et des particules connues. Car ce groupe est beaucoup moins large. Les théoriciens travaillant dans le domaine de la théorie des champs de jauge avaient déjà tenté d'unifier les théories en une théorie obéissant à un groupe unique $E(6)$, (nous en avons touché un mot en disant que le groupe $SU(3) \times SU(2) \times SU(1)$ pouvait dériver d'une symétrie brisée plus large). Et la théorie des cordes hétérotiques lui ressemble beaucoup (après être passé à quatre dimensions).

De plus, Candelas, Horowitz, Strominger et Witten découvrirent qu'il existait un mécanisme spontané d'enroulement des six dimensions (sur une variété de Calabi - Yau, nous y reviendrons) comme dans la super gravité.

Cette théorie est donc la meilleure candidate à une théorie unifiée.

III. La seconde révolution

Ont dit que deux théories sont duales lorsque les deux théories décrivent le même système physique. C'est à dire lorsque deux descriptions mathématiques différentes décrivent formellement la même physique.

En 1995, Edward Witten et d'autres montrent que différentes théories des cordes sont liées par une transformation mathématique, appelée dualité S. Edward Witten montre que certaines théories ayant une forte constante de couplage peuvent être liées par des transformations mathématiques, appelées dualités, à d'autres théories, appelées théories duales, dans lesquelles la constante de couplage est très faible. Dans ces dernières, grâce à la théorie des perturbations, on peut donc calculer diverses grandeurs physiques. L'idée est d'exploiter ensuite la dualité pour exporter ces grandeurs vers la théorie initiale de forte constante de couplage où la théorie des perturbations ne peut pas être utilisée.



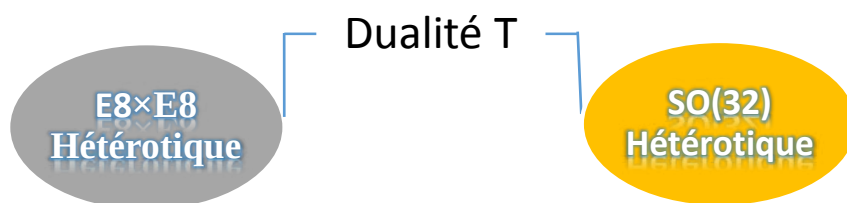
Figure 14: Edward Witten

1. La dualité T

Cette dualité relie deux théories des cordes qui diffèrent par le compactage des cordes sur une des dimensions. L'une des théories a ses cordes enroulées sur une dimension de rayon R , tandis que l'autre a ses cordes enroulées sur une dimension inverse L/R . Donc quand une théorie décrit des cordes enroulées sur une petite dimension, l'autre décrit des cordes enroulées sur une grande dimension. La valeur de la constante L est reliée à la tension de la corde.

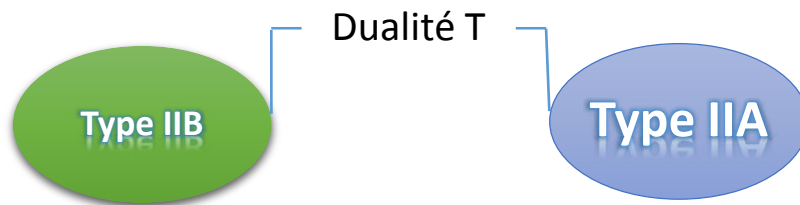
Dans une théorie l'énergie d'une corde est proportionnelle au rayon tandis que dans l'autre l'énergie est inversement proportionnelle au rayon. Ainsi les cordes duales ont même énergie.

Donc ces deux théories décrivent formellement la même physique. Leur description mathématique est différente puisqu'une théorie avec une dimension fortement enroulée correspond à l'autre théorie avec une dimension faiblement enroulée. Mais les conséquences physiques qui peuvent découler des équations sont les mêmes. On découvrit ainsi que les deux théories des cordes IIA et IIB étaient duales l'une de l'autre via la dualité T. On découvrit de même que les deux théories des cordes hétérotiques étaient duales l'une de l'autre ! Cela peut sembler étonnant au vu de leurs groupes de jauge différents ($SO(32)$ et $E(8) \times E(8)$) mais la manière d'enrouler une des dimensions peut tout changer et en particulier les symétries.



Ainsi, il s'avère que, en définitive, les deux théories IIA et IIB décrivent la même physique. De même les deux théories des cordes hétérotiques décrivent la même physique. C'est évidemment très satisfaisant de découvrir cela pour deux raisons :

- Les calculs effectués dans une théorie peuvent parfois être plus faciles lorsque l'on effectue ces calculs dans l'autre théorie. Il suffit alors de passer de l'une à l'autre par l'opération de dualité T.
- Au lieu d'avoir quatre théories des cordes, on en a plus que deux. Il est donc plus simple de chercher la "bonne" théorie !



Mais cela montre aussi que ces théories ne sont pas si simples puisque l'on n'avait pas remarqué qu'elles décrivaient la même physique ! Comment a-t-on démontré la dualité T entre ces théories ? En utilisant la théorie des perturbations. On a vu que la théorie pouvait s'écrire de manière perturbative et sous forme diagrammatique.

Les calculs sur un graphe sont plus faciles que sur la théorie dans son ensemble. Nous avons d'ailleurs vu, avec la théorie des champs, que la théorie n'était en général pas soluble de manière exacte et qu'il fallait utiliser des méthodes approchées. Démontrer une telle dualité sans passer par la théorie des perturbations est parfois très difficile.

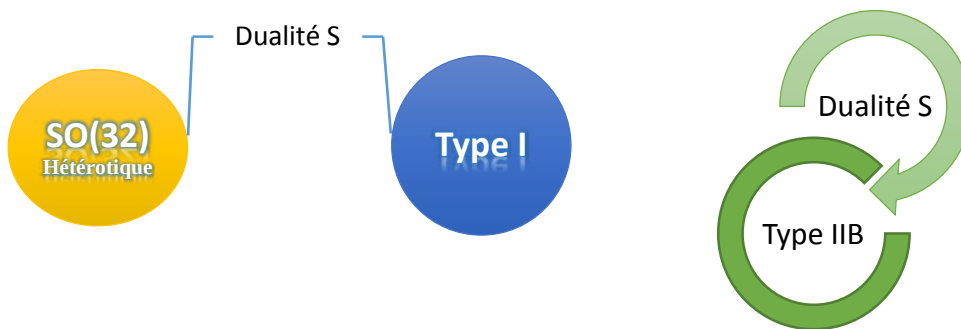
Le fait de pouvoir effectuer la démonstration via la théorie des perturbations est donc satisfaisant. On démontre que la dualité T s'applique ordre par ordre sur chaque graphe de la théorie des perturbations. Bien entendu, on n'effectue pas la démonstration pour tous les graphes (ils sont en nombre infini) ! Mais on le démontre pour le graphe le plus simple (appelé diagramme en arbre car il ne contient pas de boucle) puis on démontre que le résultat est valable pour tous les graphes plus compliqués. En fait, on démontre que si la dualité est valable pour un graphe d'ordre n , alors elle est également valable pour un graphe d'ordre $n + 1$.

2. La dualité S

Les cordes interagissent entre-elles. Nous avons vu qu'il existait une constante de couplage qui dicte l'intensité de ces interactions.

La seconde dualité qui fut découverte est la dualité S. Elle relie deux théories qui ont des constantes de couplages inverses. Lorsqu'une théorie décrit des cordes fortement couplées, l'autre théorie décrit des cordes faiblement couplées et vice versa. A nouveau, certaines caractéristiques doivent varier en sens inverse avec la constante de couplage selon la théorie. Ainsi l'énergie d'interaction (ou les distances entre cordes) doit varier dans le même sens que la constante de couplage dans une des deux théories et dans l'autre sens pour l'autre théorie. Cela rappelle l'interaction forte où la constante de couplage diminue avec l'énergie.

On découvre que la théorie IIB est duale d'elle-même. C'est à dire que lorsque l'on change la constante de couplage par son inverse, on obtient la même théorie ! Celle-ci possède un comportement identique à courte et grande distance. C'est assez surprenant.



Par contre la théorie des cordes hétérotiques $SO(32)$ est duale de la théorie I par la dualité S. Donc la théorie des cordes hétérotiques $SO(32)$ décrit un comportement à grande distance identique à la théorie I à courte distance et vice versa.

La correspondance duale entre ces deux théories est d'autant plus étonnante que la théorie I possède des cordes ouvertes alors que les théories hétérotiques n'en ont pas ! Ces deux théories décrivent pourtant la même physique mais dans des contextes différents (courtes et grandes distances).

Il est nécessaire de dire que la correspondance de ces théories par la dualité S n'est pas totalement prouvée. Où est la difficulté ?

Nous avons vu que la théorie des perturbations ne pouvait pas s'appliquer pour des grandes constantes de couplage car les termes successifs (qui sont des corrections) sont de plus en plus grand. Les résultats ne convergent pas et la théorie des perturbations est inapplicable. Dans un tel cas on a besoin de méthodes différentes par exemple des méthodes de calculs exacts (non perturbatifs).

Or ici la dualité S fait correspondre une théorie avec un faible couplage avec une autre théorie avec un fort couplage. Quel que soit le couplage, il y a toujours une des deux théories où l'on ne peut utiliser la théorie des perturbations !

Par conséquent, il est impossible de démontrer la dualité S en utilisant la théorie des perturbations. On a besoin d'une démonstration qui se fait sur la totalité de la théorie, de manière exacte, non perturbative. Bien entendu, une telle démonstration est beaucoup plus difficile.

On peut toutefois effectuer une démonstration "approchée". C'est à dire montrer qu'il y a presque correspondance et probablement correspondance exacte.

On effectue la correspondance pour des interactions avec un diagramme en arbre pour l'une des deux théories et on vérifie que par dualité S, on obtient "presque" l'autre théorie. Pourquoi presque ? D'une part on a comparé une théorie "tronquée" (uniquement les diagrammes en arbre) avec une théorie complète, d'autre part la vérification sur l'autre théorie, complète, est très difficile puisque l'on n'y applique pas la théorie des perturbations.

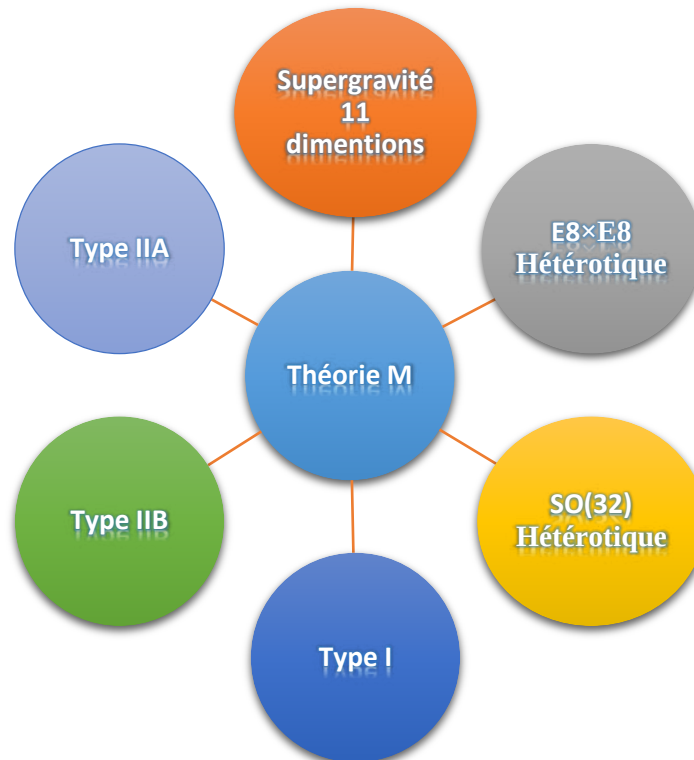
Puis on regarde le diagramme suivant et on vérifie que la dualité est améliorée. Et ainsi de suite. L'idéal serait de montrer qu'en prenant en compte tous les diagrammes la dualité s'améliore sans cesse jusqu'à devenir parfaite mais l'on n'y est pas encore arrivé. C'est un des grands challenges pour le futur.

En plus de ce type de raisonnement, les théoriciens ont découvert un vaste faisceau d'indices qui sont en faveur d'une dualité exacte entre les deux théories. Même en l'absence d'une démonstration rigoureuse (et en attendant celle-ci) les théoriciens conjecturent que la dualité est exacte.

Une telle dualité est très pratique dans l'étude de problèmes concrets. Supposons que je souhaite étudier une réaction particulière entre les cordes où la constante de couplage de l'interaction est grande. Je constate donc que je ne peux pas appliquer la théorie des perturbations et le manque d'outils mathématique m'empêche d'effectuer un calcul exact. Aucun problème ! J'applique la dualité S et je me retrouve avec une situation avec une faible constante de couplage. Je peux donc, cette fois, appliquer la théorie des perturbations. J'effectue les calculs puis j'applique à nouveau la dualité S pour revenir à la description initiale et le tour est joué.

3. Les résultats de la seconde révolution

La découverte de ces dualités en 1994 constitua ce qui fut appelé la seconde révolution.



Nous verrons qu'il y a également moyen de regrouper également les deux groupes de théories.

Donc toutes ces théories (en anticipant un peu) n'en forment en réalité qu'une seule ! Ce qui est évidemment très satisfaisant puisque l'on a plus à chercher laquelle s'applique à la réalité. Il suffit de le prouver pour l'une et les autres suivront automatiquement.

Quelles sont donc les différences entre-elles ? Formellement, elles décrivent la même physique mais leur domaine d'application est très différent. Les différences sont, par exemple :

- La définition du vide quantique
- L'énergie des interactions
- L'intensité du couplage entre les cordes
- La façon de replier les dimensions (nous y reviendrons)
- Les échelles de distances
- Les conditions aux limites. Par exemple, dans la théorie des collisions on a vu qu'on partait et qu'on arrivait à une situation où les particules sont libres. On appelle ces deux situations des

conditions aux limites. Pour une même description de réactions entre cordes, les conditions aux limites de deux théories des cordes peuvent correspondre à des situations physiques très différentes.

- Les D-branes
- L'approche du problème : perturbatif ou non perturbatif.

Ces théories sont définies dans un espace-temps à 10 dimensions. Si l'on ajoute une dimension supplémentaire, on peut établir de nouveaux liens entre elles mais également avec les théories de supergravité à 11 dimensions. Cela suggère que toutes ces théories sont incluses dans une théorie encore plus générale, qui a reçu le nom de M-theory. La lettre M viendrait probablement de Magic ou Mystery.

IV. La théorie M

Nous avons donc besoin d'une description mathématique unique qui unifierait les descriptions de toutes les théories des cordes. Quelle pourrait être la forme d'une telle théorie ?

4. La dualité U

On a également découvert une théorie, utilisant des membranes (en faisant un détour par la théorie des cordes avec des D-branes), qui se déroule dans un espace à 11 dimensions et qui est équivalente aux autres théories !

En enroulant les membranes sur un cercle, on repasse à 10 dimensions et les membranes enroulées forment des cordes donnant la théorie IIA.

En enroulant les membranes sur un segment de droite, on retombe sur la théorie des cordes hétérotiques $E(8) \times E(8)$. La correspondance entre ces théories s'appelle la dualité U.

Nous avons donc, comme annoncé, une relation reliant toutes les théories entre elles.

Notons que cette théorie n'est toujours qu'un cas limite avec un domaine d'application particulier. Comme pour chacune des théories des cordes existantes. Ce qui distingue ces théories (fort ou faible couplage, etc.) reste donc aussi d'application pour cette théorie et elle ne constitue donc pas notre fameuse théorie M (bien qu'elle soit parfois abusivement appelée comme cela à cause des membranes).

Il existe même une théorie F à 12 dimensions !

5. La théorie M

Bien que différente de la théorie présentée ci-dessus, on a pu déterminer que la théorie M serait une théorie à 11 dimensions. Ceci est évidemment très satisfaisant puisque c'était un des problèmes rencontrés. On a vu qu'une théorie de super gravité consistante nécessitait un espace-temps à 11 dimensions.

Différentes approches et études des différentes théories ont déjà permis d'audacieuses idées et spéculations.

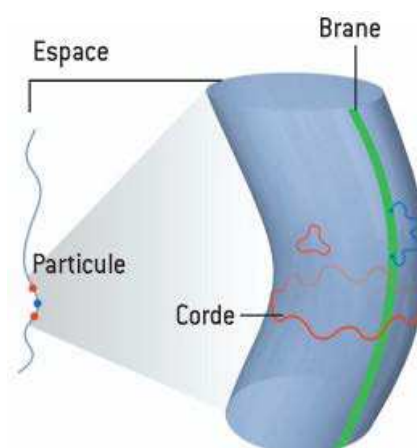


Figure 15: les membranes

Ainsi, on a par exemple imaginé que notre univers (à quatre dimensions) ne serait rien d'autre qu'une 3-brane (plus le temps) se déplaçant dans un univers à 10 dimensions (d'espace).

Les particules (fermions et bosons de jauge obéissant aux groupes habituels $SU(3) \times SU(2) \times SU(1)$) ne seraient que les modes de vibrations des cordes dont l'extrémité est attachée à la 3-brane (notre univers). Extrémités qui se comporteraient comme des particules !

Le graviton serait une corde fermée se déplaçant dans la totalité de l'espace à 10 dimensions (il n'est pas attaché à la D-brane). Une conséquence intéressante est que cela explique naturellement la faiblesse de la gravité par rapport aux autres interactions fondamentales.

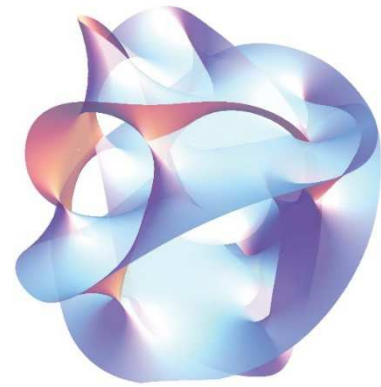


Figure 16: Variété de Calabi-Yau

Ce genre d'univers autoriserait même un repliement de ces dimensions sur des distances beaucoup plus grande que la longueur de Planck. En effet, les photons (la lumière) et les particules (qui nous composent) étant astreint à se déplacer sur la 3-brane, ils ne nous permettraient pas de "voir" les dimensions supplémentaires ! Mais l'enroulement ne peut pas dépasser le millimètre car la gravité a été testée jusqu'à cette distance sans constater d'écart avec la gravité normale. En effet, à grande échelle l'enroulement des dimensions supplémentaires rend celles-ci sans influence et la gravité se comporte comme elle est décrite par la relativité générale (et la théorie de Newton) dans un espace-temps à 4 dimensions. Mais pour des distances de l'ordre des dimensions enroulées, le graviton pouvant se déplacer dans des dimensions supplémentaires, les lois classiques devraient fortement dévier de la gravité observée.

On peut même imaginer qu'il y a plusieurs 3-branes et donc plusieurs univers qui n'interagiraient que par l'intermédiaire de la gravité à travers l'espace entre les 3-branes (appelé bulk). Ce qui donne des idées pour expliquer l'origine de la masse manquante de l'univers (voir les théories cosmologiques) ! Ce genre de théorie a même déjà été envisagé en dehors du contexte de la théorie des cordes (univers jumeaux, etc.).

En tout cas, toutes spéculatives qu'elles soient, ces idées autorisent des enroulements plus variés des dimensions et enrichissent encore la théorie.

Quoi qu'il en soit, la théorie M est encore imparfaitement comprise et sa forme mathématique reste en réalité complètement à imaginer. En particulier on a besoin d'outils non perturbatifs plus puissants pour "débroussailler" la théorie.

Toutefois de nombreux résultats quant à ses propriétés ont déjà été établis, c'est encourageant.

Une formulation matricielle des théories des cordes semble actuellement donner un cadre qui pourrait s'avérer le bon (cela reste encore à voir).

Un certain rapprochement avec les théories géométriques (géométries non commutatives, théorie des boucles, mousses de spin,...) est également en train de se faire. Mais ce n'est pas sans difficulté puisque l'espace-temps des cordes, quel que soit le nombre de dimensions envisagé, a une géométrie commutative. Pire encore, l'espace-temps de la théorie des cordes est indépendant du contenu, contrairement à la relativité générale (comme on l'a vu), d'où de grosses difficultés pour relier les deux théories.

Conclusion

Le XXe siècle a vu naître les deux plus belles théories physiques jamais inventées. La première, la relativité générale, est l'œuvre du seul Albert Einstein. Son domaine d'application est l'infiniment grand. La seconde, la mécanique quantique, est l'œuvre collective de certains des plus grands esprits du XXe siècle. Son domaine d'application est l'infiniment petit. Mais ces deux théories sont incompatibles entre elles. Cherche-t-on à les réunir dans ce qu'on appelle la " théorie du tout ", cette théorie, qui stipule que les particules élémentaires ne seraient pas ponctuelles mais semblables à de minuscules cordes vibrantes : chaque vibration correspondrait à une particule, comme chaque fréquence sonore définit une note de musique. Aussi poétique soit cette vision de la matière, elle présente un inconvénient majeur, celui de se prêter très mal à l'expérimentation, on se heurte alors à d'insurmontables difficultés. Aujourd'hui, la " théorie des cordes " semble en passe de réussir là où toutes les précédentes théories ont échoué : ce faisant, elle bouleverse notre conception de la matière, de l'espace et du temps. C'est l'histoire pleine de rebondissements de cette révolution en marche - où les particules élémentaires s'avèrent semblables à d'infinis bouts de ficelle, où l'espace-temps se déchire, se répare, se replie en dix dimensions invisibles, où le Big-Bang et les trous noirs prennent des formes inattendues - que nous raconte ici l'un de ses éminents acteurs. Après la relativité générale et la mécanique quantique, l'avenir appartient-il à la " théorie des cordes " ?

Bibliographie

Site web : (dernier visite 22/05/2014)

http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_cordes

<http://superstringtheory.com/>

http://www.physique-quantique.wikibis.com/theorie_des_cordes.php

<http://www.diffusion.ens.fr/vip/pageJ01.html>

<http://astronomia.fr/seminaires/annee1213/thDesCordes.php>

<http://voyage.in2p3.fr/standard.html>

http://www.canal-u.tv/video/universite_de_tous_les_savoirs/la_theorie_des_cordes.1442

<http://www.astrosurf.com/luxorion/quantique-supercordes.htm>

http://jac_leon.perso.neuf.fr/gravitation/article-francais/f-310.html

Livre :

A.MARRAKCHI : cours de la mécanique quantique SMP S3.

A. Jorio : cours de la mécanique quantique SMP S5.

Lee Smolin : Rien ne va plus en physique ! : L'échec de la théorie des cordes (dunod).

L. Marleau : Introduction à la physique des particules (Université Laval- Canada).

Brian Greene : L'Univers élégant (ROBERT LAFFONT).

Autre ressource :

Conférence : BACHAS COSTAS « LA THÉORIE DES CORDES » à université de tous les savoirs en 25/06/05

Documentaire : « The Elegant Universe » PBS, Brian Green on quantum mechanics and string theory

Magazine : Sciences et Vie Hors-Serie 260 Septembre 2012

Projet de fin d'étude : « les 4 foces fondametales » ABDELALI DAOUMI en 2013